筋トレーニングの組織学的研究

——静的筋トレーニングと動的筋トレーニングの骨格筋線維に及ぼす影響の比較——

菊 地 邦 雄*

(昭和46年2月16日受付)

Histological Study on the Muscular Training

——Comparison of the Effects of Static Training and Dynamic Training upon Skeletal Muscle Fibers——

Kunio Kikuchi

(Faculty of General Education, Hiroshima University)

筋トレーニングの方法を分類すると、等尺性筋収縮を主とする静的筋トレーニングと等張性筋収縮を主とする動的筋トレーニングに大別されるが、各々のトレーニングを行つた際の筋肥大の現象を赤筋線維、白筋線維に分けて組織学的に検討することを目的とする。

静的筋トレーニングは、ラットを木につかまらせて体重を支えさせる方法、動的筋トレーニングは、トレッドミル走を行わせた。

実験結果は次の通りである。

- (1) ラット下肢筋の各筋重量は、静的筋トレーニング及び動的筋トレーニングにおいて増加する。
- (2) M. tibialis ant. の全横断面積の増加率は、静的筋トレーニングでは、赤筋線維15.0%、白筋線維11.1%であり、動的筋トレーニングでは、赤筋線維13.2%、白筋線維19.4%であつた。
- (3) 筋線維一本当たりの平均横断面積に及ぼすトレーニングの影響は、全横断面積の場合と同じ傾向を示した。

The purpose of this study was to inquire histologically the relative effects of static training and dynamic training upon skeletal muscle fibers by making a distinction between red muscle fibers and white muscle fibers.

The experimental animals, Wistar-strain rats, formed two experimental groups and performed muscular training exercises. Static training group was made to sustain one's body sticking at a tree for one hour a day and 6 days out of a week for a period of 40 days. Dynamic training group was compelled to run on the treadmill with a speed of 40 m/min., a distance of 250m, and 6 days out of a week for 40 days. Rats of the same venter were used as the control group.

The histological method, using Sudan black B stain, was adopted.

The results obtained were as follows:

- (1) The weight of each muscle of the rats' lower limbs increased in static and dynamic training groups.
- (2) In static training group, the increasing rate of the entire area of cross section of red muscle fibers in M. tibialis ant. was 15.0 %, and that of white muscle fibers was 11.1 %. In dynamic training group, the increasing rate of the entire area of cross section of red muscle fibers was 13.2 %, and that of white muscle fibers was 19.4 %.
- (3) The effect of training on the average area of cross section per fiber showed the same tendency as the effect of training on the entire area of cross section in static in and dynamic training groups.

(Kikuchi, Kunio, Histological Study on the Muscular Training —Comparison of the Effects of Static Training and Dynamic Training upon Skeletal Muscle Fibers, *Research Journal of Physical Education*, Vol. 16, No. 2, October, 1971, pp.67~74)

* 広島大学

緒 言

筋トレーニングの方法を筋収縮の面から分類すると、等尺性収縮を主とする静的筋トレーニングと等張性収縮を主とする動的筋トレーニングに大別される。

筋トレーニングの筋肥大についての組織学的研究は、古くから、B. Morpurgo¹⁾, H. Petow et al²⁾, F. Kleeberger³⁾ 等によつて、筋線維のレベルで検討され、最近では、W. Reitsma⁴⁾ によつて研究されている。

しかし、これ等の研究は、主として、トレッドミル走のような動的筋トレーニングについて行われ、静的筋トレーニングと動的筋トレーニングについて、筋線維を赤筋線維、白筋線維に分けて比較検討した資料はみられない。

著者等⁵⁾ は、すでに、ラットを用いて、動的筋トレーニングを行つた際の筋肥大の現象を組織学的に検討し、白筋線維の肥大率が赤筋線維より大きいことを報告した。

本研究では、静的筋トレーニングと動的筋トレーニングを行つた際の筋肥大の様相を、ラットの M. tibialis ant. を用いて、赤筋線維、白筋線維に分けて検討し、筋トレーニングの方法と筋肥大の関係を明らかにすることを目的としている。

実 験 方 法

実験動物は、同腹の Wistar 系ラット（3腹、A・B・C）の雌のみ17匹を使用し、体重を基にして、同腹毎に、(1)静的筋トレーニンググループ、(2)動的筋トレーニンググループ、(3)コントロールグループの3群に分けた。

1) トレーニング方法

トレーニング方法は、第1図に示すとおりである。

(i) 静的筋トレーニング

生後30日から、ラットを木につかまらせて体重を支えさせる方法で、1日に1時間、週に6日のトレーニングを40日間行わせた。

(ii) 動的筋トレーニング

分速40m、走行距離250mのトレッドミル走を、静的筋トレーニングの場合と同じく、生後30日か

Static training

Dynamic training

Fig. 1 Training Methods

ら、週に6日、40日間行わせた。

2) 顕微鏡標本の作成

顕微鏡標本作成の手順は、次の通りである。

(a) 固定：被検筋を、10%ホルマリンに浸液し、約3週間固定する。

(b) 包埋：固定した筋肉を、セラチン液（1%の石炭酸30cc、セラチン粉末10gの割合）に入れて、約24時間、恒温槽内で包埋する。

(c) 薄切：Sartorius型マイクロトームを用い、電子冷凍式マイクロトームで氷結し、15~25 μ に薄切して染色する。

(d) 染色：染色は、染色剤 Sudan black B を使用した Lison 氏法⁶⁾ である。染色時間は組織の種類、液温によつて異なるが、約30分である。

(3) 資料の整理

筋線維の横断面積の測定は、顕微鏡写真を取り、細胞一ヶ毎に写真印画紙を切り抜き、筋線維を赤筋線維、白筋線維に分けて秤量し、面積に換算する方法をとつた。

ラットの飼育には、オリエンタル 固型飼料を用い、室温は 18°C~22°C になるようにし、トレーニンググループとコントロールグループが同一条件で飼育することに、注意をはらった。

実験結果

静的筋トレーニング及び動的筋トレーニング終了後、ラット下肢筋の各筋重量を求めた結果は、第1表及び第2図に示すとおりである。

Fig. 2 Comparison of Weight of Each Muscle in Static and Dynamic Training

各筋重量は、静的筋トレーニンググループと動的筋トレーニンググループでは、コントロールグループに比べてより増加する傾向を示した。

静的筋トレーニンググループと動的筋トレーニンググループの間で、筋重量の増加を比較してみると、M. tibialis ant., M. soleus, M. plantaris 及び M. ext. digi. longus では、動的筋トレーニンググループの方が、静的筋トレーニンググループに比べて増加する割合は大きく、M. gastrocnemiusでは、静的筋トレーニンググループの方が、動的筋トレーニンググループより増加する割合が大きい傾向を示した。

第2表は、M. tibialis ant. の全筋線維数及び全横断面積に及ぼすトレーニングの影響を、静的筋トレーニンググループと動的筋トレーニンググループについて、赤筋線維、白筋線維に分けて検討したものである。

全筋線維数について、赤筋線維数と白筋線維数

Table 1 Effects of Static and Dynamic Training on Weight of Each Muscle

group	Sample number	M. tibialis ant.	M. gastrocnemius	M. soleus	M. plantalis	M. ext. digi. longus
Static training	A ₁	0.348 ^g	1.008 ^g	0.338 ^g	0.066 ^g	0.066 ^g
	A ₂	0.304	0.938	0.330	0.066	0.068
	B ₁	0.332	1.020	0.314	0.072	0.066
	B ₂	0.384	1.170	0.356	0.094	0.070
	C ₁	0.304	1.136	0.348	0.074	0.070
	C ₂	0.298	0.966	0.300	0.066	0.060
	Mean	0.328	1.040	0.331	0.073	0.068
Dynamic Training	A ₁	0.350	0.938	0.384	0.076	0.080
	A ₂	0.348	1.018	0.368	0.094	0.072
	B ₁	0.332	1.114	0.382	0.080	0.084
	B ₂	0.388	1.078	0.406	0.088	0.072
	C ₁	0.290	0.874	0.284	0.070	0.070
	Mean	0.342	1.004	0.365	0.082	0.076
control	A ₁	0.320	0.960	0.328	0.070	0.086
	A ₂	0.312	0.848	0.274	0.058	0.064
	B ₁	0.338	1.074	0.356	0.076	0.046
	B ₂	0.304	1.008	0.342	0.088	0.086
	C ₁	0.336	0.946	0.302	0.062	0.078
	C ₂	0.286	0.836	0.250	0.050	0.062
	Each	0.316	0.945	0.309	0.067	0.070

Each A. B. C=Each rat of the same venter

Table 2 Effects of Static and Dynamic Training on Rats' Body Weight, Number of Muscle Fibers and Entire Area of Cross Section of M. tibialis ant.

group	Sample number	Body Weight	Number of muscle fibers		Entire area of cross section	
			Red fibers	White fibers	Red fibers	White fibers
Static training	A ₁	153.0 g	8649	5700	5.97 ^{mm²}	7.22 ^{mm²}
	A ₂	146.0	7572	5672	5.26	6.53
	B ₁	164.5	5585	5452	4.69	7.69
	B ₂	180.0	7745	6374	6.11	8.63
	C ₁	165.0	8395	6024	5.98	7.67
	C ₂	156.0	8520	5011	5.63	6.08
	Mean	160.8	7744	5706	5.61	7.30
Dynamic training	A ₁	164.0	9148	5986	6.00	7.69
	A ₂	152.5	7046	6827	4.52	8.41
	B ₁	181.0	7600	4784	5.21	6.71
	B ₂	176.5	9188	5328	6.69	7.98
	C ₁	156.5	7675	5505	4.69	7.72
	Mean	166.1	8131	5686	5.42	7.70
Control	A ₁	159.0	8331	6155	5.18	6.56
	A ₂	139.0	6985	4747	4.47	5.16
	B ₁	171.0	7280	5410	5.21	7.03
	B ₂	148.5	8568	5744	5.09	7.40
	C ₁	171.0	7839	5773	4.86	5.91
	C ₂	148.5	8006	5506	4.46	6.64
	Mean	156.1	7834	5556	4.88	6.45

の比率を求めると、静的筋トレーニンググループでは、1.36、動的筋トレーニンググループでは、1.43、コントロールグループでは、1.41を示し、トレーニンググループとコントロールグループの間で明らかな差はみとめられなかつた。

全横断面積に及ぼすトレーニングの影響を増加率で検討してみると、静的筋トレーニンググループでは、赤筋線維、15.0%、白筋線維、11.1%で赤筋線維の全横断面積の増加する割合は、白筋線維のそれより大きく、動的筋トレーニンググループでは、それぞれ、13.2%、19.4%を示し、反対に、白筋線維の増加する割合が、赤筋線維より大きい結果を得た(第3図)。

第3表は、M. tibialis ant. の筋線維1本当りの平均横断面積に及ぼすトレーニングの影響を、静的筋トレーニンググループと動的筋トレーニンググループについて、赤筋線維と白筋線維に分けて

Fig. 3 Effects of Static and Dynamic Training on Entire Area of Cross Section of M. tibialis ant.

検討したものである。

筋線維の肥大率を求めると、静的筋トレーニンググループの赤筋線維の肥大率は17.1%、白筋線維のそれは6.3%であり、一方、動的筋トレーニンググループでは、それぞれ、10.0%、17.4%を示した。このことは、筋線維の全横断面積の場合と同じ傾向を示したことになる(第4図)。

以上の検討を、ラットの同腹(3腹、A・B・C)

Table 3 Effects of Static and Dynamic Training on Average Area of Cross Section per Fiber and Ratio between Average Area of Cross Section per White Fiber and That per Red Fiber

group	Sample number	Area of cross section per fiber		Diameter per fiber		Area of cross section per white fiber	Area of cross section per red fiber
		Red fiber	White fiber	Red fiber	White fiber		
Static training	A ₁	690.5 ^{μ²}	1267.0 ^{μ²}	29.6 ^μ	40.2 ^μ		1.84
	A ₂	695.0	1150.4	29.8	38.2		1.66
	B ₁	838.0	1410.7	32.6	42.4		1.68
	B ₂	788.6	1353.3	31.4	41.6		1.72
	C ₁	712.6	1273.7	30.0	40.2		1.79
	C ₂	661.3	1212.6	28.4	39.2		1.83
	Mean	731.1	1278.0	30.6	40.4		1.75
Dynamic training	A ₁	655.6	1284.7	28.8	40.5		1.96
	A ₂	641.0	1231.6	28.6	39.2		1.92
	B ₁	685.3	1401.8	29.4	42.2		2.05
	B ₂	728.0	1497.7	30.4	43.8		2.06
	C ₁	610.8	1401.9	27.2	42.2		2.30
	Mean	664.1	1363.5	29.0	41.6		2.06
Control	A ₁	621.7	1066.3	28.0	36.8		1.72
	A ₂	639.9	1086.3	28.6	37.0		1.70
	B ₁	715.4	1299.2	30.0	40.6		1.82
	B ₂	593.5	1288.4	27.4	40.4		2.17
	C ₁	619.8	1023.5	28.0	38.0		1.65
	C ₂	557.2	1206.7	26.4	39.2		2.17
	Mean	624.6	1161.7	28.2	38.4		1.87

Fig. 4 Effects of Static and Dynamic Training on Average Area of Cross Section per Fiber.

毎に行ってみたが、やはり同様な傾向を示した。

観点をかえて、白筋線維1本当りの平均横断面積と赤筋線維のそれとの比率を求め、静的筋トレーニンググループ、動的筋トレーニンググループ及びコントロールグループについて、筋肥大の様相を検討した結果は、第3表及び第5図に示すと

Fig. 5 Effect of Each Training on Ratio of Average Area of Cross Section per White Fiber to That per Red Fiber.

おりである。その比率の大きさは、動的筋トレーニンググループ、コントロールグループ、静的筋トレーニンググループの順であつた。このことは、動的筋トレーニングでは、白筋線維の肥大す

Fig. 6 Photographs Show the Effect of Each Training upon Skeletal Muscle Fibers (Sudan black B staining, $\times 600$)

る割合は、赤筋線維より大きく、静的筋トレーニングでは、赤筋線維の肥大する割合が、白筋線維より大きいことを意味している。

第6図は、静的筋トレーニングと動的筋トレーニングの *M. tibialis ant.* の組織像を示したものである。

論 議

等尺性筋収縮を主とした静的筋トレーニングと等張性筋収縮を要素にもつ動的筋トレーニングを行った際のトレーニングの影響を比較した文献は多い。

E. F. Chui⁷⁾, D. K. Mathews et al⁸⁾ は、筋力と運動速度に及ぼすトレーニングの影響を検討し、静的筋トレーニングと動的筋トレーニング共に、筋力と運動速度にトレーニング効果があらわれたことを報告し、また、J. D. Dennison et al⁹⁾ は、筋持久性に及ぼすトレーニングの影響を調べ、トレーニング効果は、静的筋トレーニング及び動的筋トレーニングにみられたが、トレーニングの間では、統計的差異はみとめられなかつたと述べている。さらに、R. A. Berger¹⁰⁾ は垂直跳に及ぼす影響を検討し、動的筋トレーニングの方が静的筋トレーニングよりも垂直跳の成績に及ぼす効果は大きいと報告している。

筋トレーニングの筋肥大の現象を、筋線維のレ

ベルで追求した研究には、古くは、B. Morpurgo¹⁾ が、犬を用いて、2ヶ月間の激しいトレッドミル走を行わせた後で、*M. sartorius* の筋肥大の様相を検討し、筋線維一本当りの肥大率は、53.2%～55.0%であつたと述べ、また、F. Kleeberger²⁾ はラビットの *fronto-scutularis muscle* を使い、1日に2回、30回/min. のfrequencyで120分、1ヶ月のトレーニング期間で電気刺激を加えた場合の筋重量及び1本当りの筋線維の横断面積を比較しているが、筋重量は30%、横断面積は55%の肥大を示したと言っている。最近では、W. Reitsma⁴⁾ がラットを用いて、トレッドミル走を行わせた後で、下肢筋の *M. rectus femoris*, *M. plantaris* 及び *M. soleus* の筋肥大を検討し、どの筋にも肥大がみられたことを報告している。

このように、筋線維のレベルでも、筋トレーニングの筋肥大について研究されてはいるが、骨格筋線維を赤筋線維、白筋線維に分けて検討した資料は少なく、さらに、トレーニングの方法を変えた場合の筋肥大の様相を追求した資料はみられないのである。

本研究の動的筋トレーニングでは、前回の報告⁵⁾ と同じように、白筋線維の肥大率は、赤筋線維のそれより大きいことが明らかになつた。一方、静的筋トレーニングでは、反対に、赤筋線維の肥大率が、白筋線維より大きい傾向を示したが、これ

らの現象は、骨格筋線維の機能分化と特性及び神経筋単位（以下 NMU という）の面から意味づけることができよう。

D. Jinnai¹²⁾、近藤¹³⁾は、骨格筋線維の機能の分化と構造との相関性を組織学的にとらえ、赤筋線維は tonic な機能をもち、白筋線維は phasic な機能をもつと述べている。また、C. H. Beatty¹³⁾、U. Bär¹⁴⁾は、生化学の面から、赤筋線維は酸化酵素活性が強く、TAC cycle による持続的エネルギーを持ち、一方、白筋線維は phosphorylase 活性が高く、瞬発的エネルギーを持っていると報告している。

NMU については、時実¹⁵⁾は、筋電図学的分析から、筋収縮の波形には二種類あつて、それらの pattern は、NMU のちがいによると述べ、NMU を phasic movement の機能的主体をなす白筋線維が構成要素である kinetic NMU と、postural adjustment を司る赤筋線維を構成要素にもつ tonic NMU とに分類している。また、岡島¹⁶⁾、近藤¹⁷⁾は、神経系の伝導路を組織学的に検討し、kinetic NMU は錐体路によつて支配され、tonic NMU は錐体外路によつて支配されており、神経線維は前者の方が後者より太いと述べている。斉藤¹⁸⁾は、脊髄前柱細胞の組織化学的検討から、kinetic NMU の前柱細胞は tonic NMU のそれより大きいと報告している。

さらに、最近になつて、L. Edström et al¹⁹⁾はラットの *M. tibialis ant.* を用いて、NMU の特性について追求し、それぞれの NMU は、一様の骨格筋線維によつて構成されていることを明らかにした。

このように、赤筋線維と白筋線維は機能が分化していて、異なる NMU を構成しているので、等張性収縮を主とする動的筋トレーニングでは、kinetic NMU が主に働いたために、白筋線維の肥大率が赤筋線維より大きい結果を示したものと思われる。一方、等尺性収縮を要素とする静的筋トレーニングでは、主として tonic NMU が働いた結果、赤筋線維の肥大率が白筋線維より大きい傾向を示したのではないだろうか。

以上のことから、筋トレーニングを行う際に、よりよいトレーニング効果を期待するためには、

それぞれの目的にそつたトレーニング方法を設定することが大切であろう。

総 括

同腹の Wistar 系ラットを用い、静的筋トレーニングと動的筋トレーニングを行ない、骨格筋線維に及ぼすトレーニングの影響を比較した結果、次のような成績を得た。

(1) トレーニングによつて筋重量は増加する。*M. tibialis ant.*、*M. soleus*、*M. plantaris* 及び *M. ext. digi. longus* では、動的筋トレーニンググループの方が、静的筋トレーニンググループに比べて筋重量の増加する割合が大であつた。*M. gastrocnemius* では、反対に、静的筋トレーニンググループの方が、動的筋トレーニンググループより筋重量の増加する割合が大きい傾向を示した。

(2) トレーニングの *M. tibialis ant.* の全横断面積に及ぼす影響を増加率で比較すると、静的筋トレーニンググループでは、赤筋線維 15.0%、白筋線維 11.1% で、赤筋線維の横断面積の増加する割合は、白筋線維のそれより大きく、また、動的筋トレーニンググループでは、それぞれ、13.2%、19.4% を示し、白筋線維の横断面積の増加する割合は、赤筋線維より大きい傾向を示した。

(3) 筋線維一本当たりの平均横断面積に及ぼすトレーニングの影響を肥大率で検討すると、静的筋トレーニンググループでは、赤筋線維 17.1%、白筋線維 6.3% であり、一方、動的筋トレーニンググループでは、それぞれ、10.0%、17.4% を示し、トレーニングの影響は、全横断面積の場合と同じ傾向を示した。

（本論文要旨は第20回日本体育学会で発表した。また、本研究の一部は、1970年度文部省科学研究費補助金によるものである）

参 考 文 献

- 1) B. Morpurgo ; Über Activitäts-Hypertrophie der willkürlichen Muskeln, Virchows Archiv Vol. 150, P. 522-554, 1897
- 2) H. Petow and W. Siebert : Studien über

- Arbeitshypertrophy des Muskels, Z. Klin. Med. Vol. 102, P. 427~433, 1925
- 3) **F. kleeberger**: The Effects of Excessive Activity on Muscle Tissue, from A. H. Steinhaus lecture prints in Tokyo University, 1962
 - 4) **W. Reitsma**: Skeletal muscle hypertrophy after heavy exercise in rats with surgically reduced muscle function, American Journal of Physical medicine, Vol. 48, No. 5, p. 237~258, 1969
 - 5) **M. Man-i, K. Ito and K. Kikuchi**: Histological Studies of Muscular Training, Report 1. Effect of Training upon Skeletal Muscle Fibers, Research Journal of Physical Education, Vol. 11, No. 3, P. 153~165, 1967
 - 6) 岡本耕造, 上田政雄, 前田隆英: 顕微鏡的組織化学 p. 276, 医学書院, 1955
 - 7) **E. F. Chui**: Effects of Isometric and Dynamic Weight-Training Exercises upon Strength and Speed of Movement, The Research Quarterly, Vol. 35, No. 3, p. 246~257, 1964
 - 8) **D. K. Mathews and R. Kruse**: Effects of Isometric and Isotonic Exercises on Elbow Flexor Muscle groups, The Research Quarterly, Vol. 28, No. 1, p. 26~37, 1957
 - 9) **J. D. Dennison, M. Howell, and W. R. Morford**: Effect of Isometric and Isotonic Exercise Programs upon Muscular Endurance, The Research Quarterly, Vol. 32, No. 3, 1961
 - 10) **R. A. Berger**: Effects of Dynamic and Static Training on Vertical Jumping Ability. The Research Quarterly, Vol. 34, No. 4, p. 419~423, 1963
 - 11) **D. Jinnai**: Functional Differentiation of Skeletal Muscles, Acta med. Okayama, Vol. 14, P. 159~169, 1960
 - 12) 近藤正美: 骨格筋の機能分化と構造との相関性に関する組織学的研究, 第1編骨格筋線維の機能分化と構造との相関性に関する研究, 岡山医学誌, Vol. 71, p. 3569~3580, 1959
 - 13) **C. H. Beatty, R. D. Peterson, and R. M. Bocek**: Metabolism of red and white muscle fibers groups, American Journal of Physiol., Vol. 204, No. 5, p. 939~942, 1963
 - 14) **U. Bär M. C. Blanchaer**: Glycogen and CO₂ production from glucose and lactate by red and white skeletal muscle, American Journal of Physiol., Vol. 209, No. 5, p. 905~909, 1965
 - 15) 時実利彦: 筋電図の臨床. 協同医学出版社, 1952
 - 16) 岡島邦雄: 白筋及び赤筋線維とこれを支配する α 前柱細胞に関する組織学的研究, 岡山医学誌, Vol. 71, p. 4299~4313, 1959
 - 17) 近藤正美: 骨格筋の機能分化と構造との相関性に関する組織学的研究, 第2編筋線維の神経支配に関する組織学的研究, 岡山医学誌, Vol. 71, P. 3582~3590 1959
 - 18) 斎藤邦雄: 骨格筋線維および脊髓前柱細胞の機能分化に関する組織化学的研究, 第2編骨格筋機能分化よりみた脊髓前柱細胞の組織化学的研究, 岡山医学誌, Vol. 71, p. 4389~4397, 1959
 - 19) **L. Edström and E. Kugelbers**: Properties of Motor Units in the Rat Anterior Tibial Muscle, Acta Physiol. Scandina., Vol. 73, P. 543~544, 1968